关中平原城市群韧性空间关联网络及其影响因素研究

史玉芳， 牛 玉
（西安科技大学管理学院，陕西 西安 710054）

摘 要：基于熵值法测度2011—2020年关中平原城市群11个地市的城市韧性综合评价指数，分析其韧性时空演化特征，并采用社会网络分析法和二次指派程序剖析其空间关联网络结构及影响因素。结果表明：(1) 关中平原城市群内各城市韧性整体呈上升趋势，韧性水平呈现出从省会开始向外围降低的态势。(2) 城市群韧性网络结构变得更加复杂和稳健，但地区间韧性联系呈现较强的层级性特征，也尚未完全实现互相联通的状态。(3) 西安市、咸阳市、铜川市的中心性较强，能够对周边或边缘城市产生较多资源溢出，城市群"核心-边缘"结构明显。(4) 地理空间邻近、经济发展水平、对外开放度、政府财政支持、科技发展水平、交通基础设施的差异均显著影响城市群韧性空间网络结构的变化。关中平原城市群可通过建设城际数字化管理与交流平台、加强交通网络建设、增加科技创新投入等途径提升城市韧性与城市间的关联性。

关 键 词：城市韧性；空间关联；社会网络分析；关中平原城市群
文章编号：1000－6060(2024)02－0270－11(0270～0280)

当前城市面临着复杂多变的外部环境和内部压力，另一方面也受到自然灾害和公共危机的冲击，建设韧性城市是减轻灾害对城市的影响与实现高质量发展的路径选择。党的二十大报告中提出以城市群、都市圈为依托构建大中小城市协调发展格局，提高城市规划、建设、治理水平，打造宜居、韧性、智慧城市。在城市集群发展模式下，寻找构建城市群内部韧性发展规划的着力点、加强城市内部建设将是城市治理的新方向。城市韧性是指城市中某一系统或多元耦合系统的持续防控能力，是对城市复杂系统安全的综合测度。提升城市群韧性水平可通过地区间的联系交互实现，而借助城市间经济、基础设施等要素资源的流通与互补，能够提升各城市内部系统预防、抵御、响应、适应和恢复的能力[1]。关中平原城市群处于我国内陆中心，是带动中西部迈向高韧性发展水平的切入点。2022年6月，国家发展改革委发布《关中平原城市群建设"十四五"实施方案》，指出依托西安国家中心城市加快培育现代化都市圈，增强轴带上节点城市承载能力，提升城市群空间发展凝聚力。可见，关中平原城市群发展将步入新阶段，与此同时，城镇化的快速发展导致城市群面临的资源环境约束和不确定性风险不断增加[2]，因此，分析关中平原城市群韧性发展网络特征，对于促进城市群内部实现融合共生的韧性联系以及区域高质量发展格局具有重要意义。

回顾现有文献，对城市群韧性的研究主要包括3个方面：一是关于城市群韧性综合或某维度的时空演化研究。贺山峰等[3]运用强制确定法、熵值法和空间自相关分析法分析长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变特征及关联性。Lu等[4]结合BP神经网络与遗传算法构建城市韧性测量模型对成渝城市群韧性进行测度，陈晓红等[5]则用BP神经网络对城市群未来10 a内的时空演变规律进行预测。二是在时空演化的基础上进一步分析影响区域韧性发展的因素。张鹏等[6]运用空间计量法研究影响因素对山东省城市整体韧性以及子系统韧性的作

收稿日期：2023-03-07； **修订日期**：2023-04-12
基金项目：教育部人文社会科学规划基金项目(21YJA630078)；陕西省科技厅软科学项目(2021KPM149)；西安市软科学项目(21RKYJ0015)资助
作者简介：史玉芳(1980-)，女，博士，教授，主要从事城市更新与可持续发展等方面的研究. E-mail: shiyufang@xust.edu.cn
通讯作者：牛玉(1999-)，女，硕士研究生，主要从事城市管理与城市韧性等方面的研究. E-mail: 21202230105@stu.xust.edu.cn

用。宁静等[7]利用地理加权回归模型分析人类活动强度对内蒙古区县城市韧性变化的影响。也有学者仅从影响因素角度进行研究。Li等[8]从产业结构、对外开放、政府机构等7方面运用多尺度地理回归分析黄河流域经济韧性的影响因素。Khan等[9]制定关于巴基斯坦伊斯兰堡贫民窟城市韧性的影响因素框架，对当地365人进行问卷调查。三是对城市群韧性网络特征的研究。Shi等[10]运用社会网络分析法分析粤港澳大湾区网络韧性的空间特征。蒋辉等[11-13]则分别从中国农业、中国城市、长三角城市群经济韧性角度出发，分析时空演化特征和空间网络效应。梳理现有文献后发现关于城市群韧性空间网络的研究多侧重从子系统出发用传统统计分析方法考察城市群自身的韧性综合情况，忽视了不同区域之间潜在的联系，缺乏地理空间角度上的综合性网络分析，且从区域上看关于关中平原城市群韧性的研究较少。鉴于此，本文将社会网络理论与城市韧性研究相结合，运用修正引力模型及社会网络分析法对关中平原城市群韧性空间网络结构特征与影响因素进行分析，以期为提升城市群关联度和协同韧性治理水平提供借鉴。

1 研究区概况

关中平原城市群规划范围跨越陕西省中部6个、甘肃省东部3个和山西省南部2个共11个城市，分别是西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市、渭南市、商洛市，天水市、平凉市、庆阳市，运城市、临汾市，面积为10.7×10^4 km^2，常住人口约4000×10^4人，地区生产总值约2.2×10^{12}元。目前，关中平原城市群各城市节点正加速发展，综合立体交通运输网不断完善，生态治理稳步推进，成为带领西北地区发展的重要区域。但关中平原城市群与长三角等城市群相比发展差距仍然较大，其核心城市数量少且对周边辐射带动不足，协同水平不高，探索适合关中平原城市群自身的发展模式仍极具重要性。

2 数据与方法

2.1 指标体系与数据来源

基于现有文献[14-15]以及上述关于城市群韧性的研究，在指标选取过程中以城市韧性意涵和关中平原城市群的匹配性为重点，将一级指标划分为经济、社会、生态环境、基础设施4个维度。经济韧性反映城乡平衡发展、市场潜力、对外开放水平等；社会韧性体现稳定的人口结构、人才储备、管理和教育保障等；生态环境韧性考虑生态保障、城市宜居性和城市对垃圾、污水、废弃物的处理能力；基础设施韧性关注交通、通讯通达性和城市应对危机能力，共选取28个指标构建城市韧性综合评价指标体系（表1）。研究数据来源于2012—2021年《中国城市统计年鉴》、陕西省、山西省、甘肃省以及各地市的统计年鉴，2011—2020年《中国城市建设统计年鉴》、各地市发展统计公报、中经网统计数据库，个别缺失数据采用贝叶斯插值法进行预测补全。

2.2 研究方法

（1）熵值法

熵值法主要利用熵可以对不确定性进行度量这一特点，来判断已有指标的有效性和价值，其可以避免主观赋权方法的主观性偏误，给出的指标权重值有较高的可信度[16]。使用该方法需要多个评价指标的具体数值，因此，本文采用熵值法计算关中平原城市群11个城市的韧性评价指标权重，步骤如下：

对评价指标进行标准化处理，主要采用极值标准化方法：

$$正向指标：X_{ij}=\frac{X_{ij}-\min X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}+0.0001 \quad (1)$$

$$负向指标：X_{ij}=\frac{\max X_{ij}-X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}+0.0001 \quad (2)$$

式中：X_{ij}为$i(i=1, 2, \cdots, m)$年第$j(j=1, 2, \cdots, n)$项指标的原始值和标准化处理后的最大值；$\max X_{ij}$和$\min X_{ij}$分别为第j项指标里的最大值和最小值。

计算第j项指标的熵值(E_j)：

$$E_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X_{ij}}\ln\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X_{ij}} \quad (3)$$

测度城市韧性综合评价指数(S_j)：

$$S_j=\sum_{j=1}^{n}\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-E_j)}\times\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X_{ij}} \quad (4)$$

式中：m为选定的样本；n为选定样本的城市韧性综合评价指标；$\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}X_{ij}}$为第$i$年第$j$项指标的比重；

表1 城市韧性综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation index system of urban resilience

目标层	准则层	指标层	指标属性	权重
城市韧性	经济韧性	人均GDP/元	正	0.034
		第三产业GDP占比/%	正	0.025
		城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入/%	负	0.017
		人均固定资产投资额/元	正	0.054
		人均社会消费品零售总额/元	正	0.051
		职工平均工资/元	正	0.031
		进出口贸易额占GDP比重/%	正	0.138
	社会韧性	人口自然增长率/%	正	0.025
		社会保障和就业支出占财政支出比重/%	正	0.015
		城市教育支出占财政支出比重/%	正	0.022
		公共管理、社会保障和社会组织从业人员占比/%	正	0.025
		每万人普通高校在校生人数/人	正	0.119
		每万人卫生技术人员人数/人	正	0.034
		失业率/%	负	0.025
	生态环境韧性	建成区绿地覆盖率/%	正	0.009
		人均园林绿地面积/m^2	正	0.012
		工业废水排放量/GDP/$t\cdot(10^4元)^{-1}$	负	0.003
		工业SO_2排放量/GDP/$t\cdot(10^8元)^{-1}$	负	0.004
		生活垃圾无害化处理率/%	正	0.006
		城市污水处理率/%	正	0.014
		固体废弃物综合利用率/%	正	0.046
	基础设施韧性	公路线网密度/$km\cdot km^{-2}$	正	0.024
		每万人公共汽车数/辆	正	0.080
		每万人拥有公共厕所/座	正	0.093
		每万人医院病床数/张	正	0.024
		燃气普及率/%	正	0.009
		建成区排水管道密度/$km\cdot km^{-2}$	正	0.024
		互联网普及率/%	正	0.038

$\dfrac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-E_j)}$ 为城市韧性评价指标权重。

（2）修正引力模型

已有研究表明，空间关联关系会受到地理距离的约束发生距离衰减[17]，对城市群韧性的空间关联关系来说，若2个城市自身的韧性水平都较高，距离较近，那么2个城市之间的关联性越密切，整体应对风险的抵抗力越强。因此，本文在借鉴李南等[18]研究的基础上，对引力模型进行修正，具体模型如下：

$$F_{ij}=K_{ij}\frac{L_i\times L_j}{D_{ij}^r} \tag{5}$$

式中：F_{ij}为城市i和j之间的联系强度；L_i和L_j分别为城市i和j的城市韧性发展水平，由第一步中的熵值法计算得出；考虑到本文研究时段的跨度以及公路交通在研究区域内更具广泛性，采用高德地图查询的最短公路距离作为“D_{ij}”数据；r为摩擦系数，通常取2；K为引力系数，设定$K_{ij}=\dfrac{L_i}{L_i+L_j}$，以表示城市空间联系的方向性。

在修正引力模型的基础上，测算城市i对其他城市的联系总量（F_i），计算公式如下：

$$F_i=\sum_{j=1}^{11}F_{ij} \tag{6}$$

经过处理得到城际韧性水平发展的空间联系矩阵，将每行的平均值作为该行的阈值，高于阈值的记为1，表示两城市间的韧性水平发展存在关联；低于阈值的记为0，表示两城市间的韧性水平发展不存在关联。

（3）社会网络分析方法

该方法是一种从“关系”角度运用数学方法、图论工具探索关系结构对结构组分或整体影响的跨学科分析方法[19]，目前广泛用于不同领域的网络结构分析。本文主要采用网络密度、网络关系数、网

络等级度和网络效率4个指标表征关中平原城市群韧性发展空间关联的整体网络特征，运用点度中心度、接近中心度和中介中心度3个中心性指标测度空间网络中各城市在韧性发展过程中的地位和功能。

（4）基于QAP的回归分析

二次指派程序（QAP）是研究关系型数据的非参数检验方法，不需要考虑变量间相互独立的问题[20]，由于影响区域城市韧性发展水平的因素存在交互关系，因此本文选取QAP方法探讨影响关中平原城市群韧性空间网络结构的因素。在借鉴相关研究[19,21-23]的基础上，选取地理空间邻近、经济发展水平差异、人口增速差异、对外开放度差异、政府财政支持差异、环境规制差异、交通基础设施差异、科学技术水平差异作为解释变量，其中地理空间邻近为相邻城市记为1，否则记为0。其余变量依次通过GDP增速、常住人口增速、出口贸易额占GDP比重、财政支出与财政收入的比值、一般工业固体废物综合利用率、公路货运量、公共财政支出中科教支出占比表示。以城市群内城市i和城市j之间关联强度为被解释变量。设计模型如下：

$$N = f(D, G, P, O, F, R, I, T) \tag{7}$$

式中：N为关中平原城市群韧性水平发展的空间关系矩阵；D、G、P、O、F、R、I、T分别为以上8个解释变量的城际差值矩阵，同时，为消除量纲影响，对各变量矩阵数据进行极值标准化处理。

3 结果与分析

3.1 关中平原城市群韧性测度及时空演化特征

3.1.1 关中平原城市群韧性测度及时序演化趋势

基于熵值法对数据进行测算，得到2011—2020年关中平原城市群的韧性发展水平（表2）。从整体水平看，关中平原城市群韧性水平存在明显差异，各城市10 a间韧性发展水平均值为0.1915~0.6365，与高志刚等[22]的研究结果相近，且西安市一直处于韧性综合水平最高的位置。从时序角度看，除少部分城市韧性指数小幅度下降又上升外，关中平原各城市的城市韧性综合水平总体呈现上升趋势，说明关中平原城市群韧性水平发展态势良好。计算各城市从基期至末期的涨幅，增长幅度最大的城市为渭南市与宝鸡市，涨幅分别为139.65%、121.90%，原因在于这2个城市在城市群中处于次中心位置，在韧性水平发展过程中较容易受到涓滴效应影响。增长幅度最小的城市是西安市，涨幅为30.98%，一方面在于考察基期其韧性指数已经远高于其余城市，另一方面在于其经济、社会、生态环境、基础设施韧性指数呈波动且缓慢增长趋势。

3.1.2 关中平原城市群韧性空间演化趋势 以2011、2014、2017、2020年4个时间节点为例，利用ArcGIS软件的自然断裂点法将关中平原城市群各地级市的城市韧性综合指数由高到低划分为4种类型：高等韧性、较高韧性、中等韧性和低等韧性，结

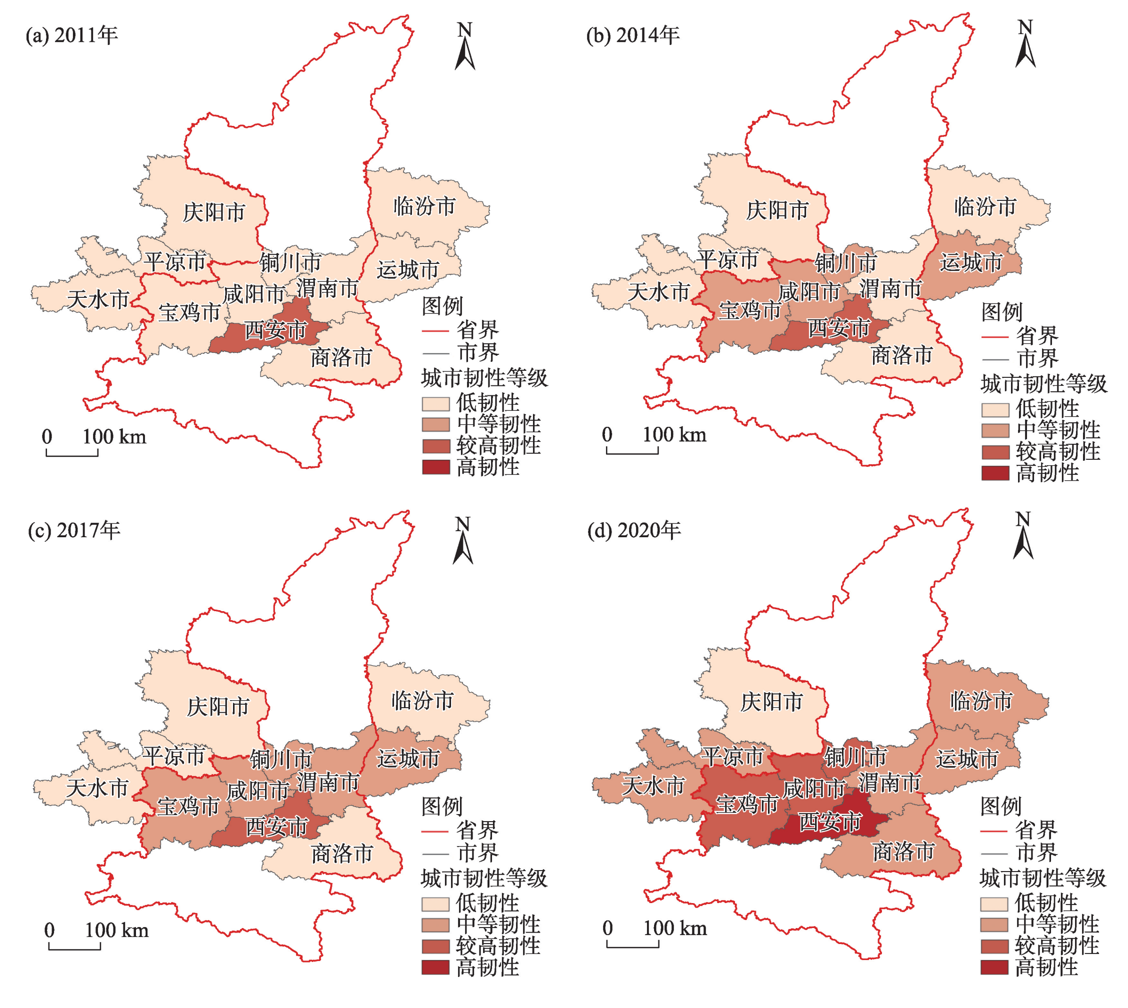
表2 关中平原城市群韧性综合水平

Tab. 2 Comprehensive resilience level of Guanzhong Plain urban agglomeration

城市	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	平均值
西安市	0.5346	0.5525	0.5905	0.6251	0.6491	0.6536	0.6488	0.6995	0.7115	0.7002	0.6365
宝鸡市	0.2005	0.2216	0.2490	0.2673	0.3051	0.3379	0.3678	0.4010	0.4282	0.4449	0.3219
铜川市	0.2311	0.2558	0.2709	0.2955	0.3183	0.3652	0.3447	0.3807	0.4436	0.4801	0.3386
渭南市	0.1440	0.1721	0.1769	0.1888	0.2066	0.2452	0.2664	0.2984	0.3303	0.3451	0.2374
商洛市	0.1334	0.1423	0.1399	0.1609	0.1706	0.1698	0.2150	0.2317	0.2639	0.2872	0.1915
咸阳市	0.2125	0.2389	0.2507	0.2688	0.2928	0.3195	0.3515	0.3714	0.3937	0.4199	0.3120
天水市	0.1608	0.1618	0.1769	0.1845	0.2031	0.2242	0.2410	0.2536	0.2624	0.2903	0.2159
平凉市	0.1397	0.1550	0.1682	0.1772	0.1934	0.2069	0.2225	0.2485	0.2658	0.3026	0.2080
庆阳市	0.1436	0.1644	0.1780	0.1957	0.2122	0.2333	0.2223	0.2372	0.2357	0.2422	0.2064
运城市	0.2128	0.2174	0.2613	0.2557	0.2510	0.2669	0.2816	0.2737	0.3000	0.2929	0.2613
临汾市	0.1875	0.1980	0.2060	0.2107	0.2260	0.2342	0.2400	0.2527	0.2689	0.2779	0.2302
平均值	0.2091	0.2254	0.2426	0.2573	0.2753	0.2961	0.3092	0.3317	0.3549	0.3712	0.2873

果见图1。

整体来看,关中平原城市群韧性水平呈现出西安市与其余10市的地域差异,这种情况在初期尤为明显,随着时间推移逐渐改善,在考察期末形成自西安市向四周递减的扩散状格局。从年份来看,2011年关中平原城市群整体韧性水平不高,低韧性水平城市呈大范围片状分布,仅西安市为较高韧性水平,此时城市群韧性的空间非均衡性显著;2014年西安市维持较高城市韧性水平不变,中等韧性城市的数量由0个增长至4个,分别是宝鸡市、咸阳市、铜川市、运城市,原因是4个城市各子系统的韧性水平增长较快,值得注意的是天水市和庆阳市,前者社会韧性、生态环境韧性水平均出现负增长,后者因GDP总量与第三产业增加值增长较快,经济韧性水平增长幅度高达184.15%,但其初期韧性水平过低,因此二者在这一年度未踏入中等韧性水平城市行列;2017年渭南市加入中等韧性水平城市行列,其在2014—2017年就业人数不断增加、收入稳步增长,推行治污降霾、实施生态修复,使得社会韧性和生态环境韧性水平加速增长,剩余5个城市为低韧性水平,此时西安市仍处于较高韧性水平的位置;2020年关中平原城市群韧性水平的空间分布态势变化显著,城市群内多数城市各子系统的韧性水平较2017年均呈不同幅度增长,使得西安市成为城市群内唯一的高韧性城市,宝鸡市、咸阳市、铜川市成为较高韧性城市。庆阳市的社会韧性水平自2014年起呈下降趋势且降幅达24.78%,导致其本身较低的韧性水平未呈大幅度提升,仍处于低韧性水平。与以往仅西安市处于较高韧性水平的局面不同,此时关中平原城市群相对形成了多中心态势,但中等韧性城市的数量仍占城市群城市数量的一半以上,说明关中平原城市群整体韧性水平仍有很



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 关中平原城市群韧性空间格局演变

Fig. 1 Evolution of resilience spatial pattern of Guanzhong Plain urban agglomeration

大的提升空间。

3.2 关中平原城市群韧性空间关联网络结构

3.2.1 整体网络结构特征分析 基于修正引力模型构建城市韧性水平发展的空间联系矩阵，使用Ucinet 6.0软件对关中平原城市群2011—2020年的整体网络结构特征进行分析(图2)。由图2可知，关中平原城市群韧性联系的网络关系数与网络密度的变化趋势保持一致，呈上升、下降而后再次上升的趋势，表明整体上城市之间的韧性联系趋向良性发展。网络关系数的增幅为4.76%，网络密度由0.381上升至0.400，一定程度上说明了在考察年间内城市群内各城市合作与资源流通逐渐增多，提升城市群的整体韧性需要注意这种溢出效应。城市群网络密度始终处于0.5平均水平以下，且2020年的网络关系数也远小于城市群内各城市最大可能关系数110个，可见关中平原城市群的韧性水平发展空间联系程度有待进一步提升，原因在于城市群内中等韧性水平城市仍然占多数，与中心城市存在较大的差距。

网络等级度在考察期前6 a维持在0.683，而后又出现小幅度上升，说明城市韧性水平发展的等级度较高，城市间韧性水平发展联系程度呈现较强的层级性特征，原因在于城市群内经济、教育、医疗等资源的流动受西安-咸阳增长极的影响较多，各城市间的韧性发展水平也存在一定程度的差异。网络效率在2014年小幅度上升，之后呈下降趋势，说明各城市在提升韧性发展水平的同时溢出路径增多，城市群内的连线和多重叠加现象增多，网络结构的稳定性逐渐增强。整体网络特征指标在考察期后4 a均呈平稳趋势发展，可能的原因是自2017年起启动规划编制，2018年《关中平原城市群发展规划》印发，政策红利促使城市群开启协同发展模式，地区之间的可达性一定程度上提升，但在2020年末城市群韧性网络整体特征的变动尚没有显现出来。

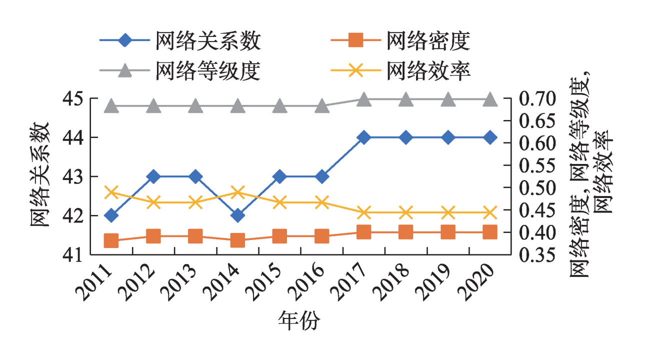


图2　2011—2020年关中平原城市群韧性空间关联网络结构指标

Fig. 2　Structural indicators of resilience spatial association network of Guanzhong Plain urban agglomeration from 2011 to 2020

使用Netdraw工具绘制2020年关中平原城市群韧性水平发展空间关联网络结构(图3)，方形面积越大代表城市节点的影响力越大。由图3可知，城市群韧性水平发展整体上趋于复杂的网络结构，非邻近城市的联系逐渐增多，但在此时期仍没有实现各城市互相联通的状态。“西咸一体”在韧性水平发展空间网络结构中作用明显，借助固有的区位优势城市间的资源得以便利交换，同时与周边城市协同联动，带动关中平原城市群发展。从整体上看，关中平原城市群韧性空间关联网络结构变得更加复杂和稳健，以西安市、咸阳市、铜川市为重要节点，通过空间集聚或扩散效应影响周边或边缘城市。

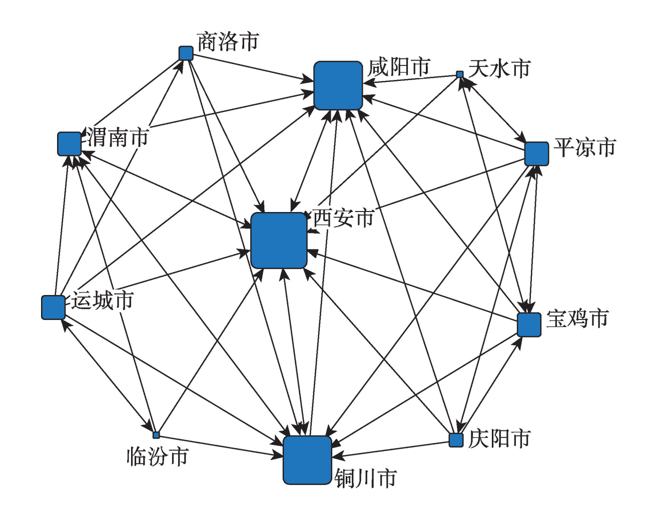


图3　2020年关中平原城市群韧性空间网络

Fig. 3　Resilience spatial network of Guanzhong Plain urban agglomeration in 2020

3.2.2 个体网络结构特征分析 以2011、2014、2017、2020年4个时间节点为例，对关中平原城市群11个城市的个体网络结构特征进行测度，结果见表3。

(1) 点度中心度用以衡量1个城市与其他城市是否有或有多少直接的韧性关联。西安市的点度中心度一直为10，说明该市在关中平原城市群韧性关联网络中处于核心地位，其经济市场活力高、科技资源雄厚，对其他节点城市具有较强的辐射能力。咸阳市与铜川市的点度中心度一直处于前3名的位置且前者稳定为9，说明二者同样处于城市群

中的中心地位，在韧性发展的过程中与其他城市的联系密切，对周边城市的集聚和扩散效应也很强。宝鸡市、平凉市的点度中心度保持为6，仅在2011、2014年达到城市群均值，说明二者对周边城市的影响力较强但没有进一步扩大；渭南市、商洛市、天水市、庆阳市、运城市、临汾市在考察年间内一直低于均值，说明这些城市与城市群中心城市的关联性较小，在网络中的作用力较弱。总体来看，关中平原城市群韧性空间网络点度中心度的变化趋势反映了强者恒强的马太效应，核心-边缘结构显著。

（2）接近中心度强调空间的距离最优，用以衡量城市间韧性关联的畅通度。西安市的接近中心度一直稳定在100，说明其在城市群中处于绝对中心行动者的位置，不需要通过其他城市中转即可与城市群中的每个城市构成韧性联系。除西安市外，在考察年间内一直高于均值的城市有铜川市、咸阳市，3个城市位于城市群的一级中心位置，与其余城市要素沟通较为方便，对外联系效率最高。2020年宝鸡市、运城市、渭南市、平凉市的数值一致并接近平均值，4个城市处于城市群的二级中心位置，与其他城市的联系也较为顺畅；商洛市、庆阳市、天水市、临汾市在网络结构处于外围位置且自身资源比较匮乏，在韧性发展过程中受其他城市的控制较多，但是接近中心度数值都达到了60以上的水平，说明这些城市不是绝对的边缘行动者。

（3）中介中心度强调媒介城市战略区位的重要性，与城市类型、等级、规模有直接关系。西安市、咸阳市、铜川市数值较高，西安市具有城市群性技术创新、信息流通等多中心地位，“西咸一体”使得资源集中化，铜川市在经济隆起带上为城市群北部商贸物流集散中心，使得三者在城市群中充当“媒介者”的角色，对网络中各城市的关联关系起到调节和控制的作用。宝鸡市、渭南市、平凉市、运城市的数值在考察期内处于0~1.5的水平之间，这些城市由于工业基础较好或占据能源优势，在网络中有一定的中介作用，但作用微弱。商洛市、天水市、庆阳市、临汾市在考察年间中介中心度一直为0，这些城市经济体量不大、特色产业不足，较难影响其他城市的韧性水平发展，在网络结构中没有起到中介和桥梁的作用。从时序演化看，2020年除渭南市的中介中心度相较于考察初期呈现上升趋势以外，其余城市呈下降或保持稳定，西安市、铜川市的下降趋势明显，说明二者的绝对中心控制作用在下降，城市群内各城市的韧性联系不断加深，城市群的网络结构正在往更均衡的方向发展。

3.3 关中平原城市群韧性空间关联网络的影响因素分析

运用Ucinet 6.0软件对2020年的数据进行QAP回归分析，经过随机置换5000次，调整后的R^2为0.242，且通过了1%水平上的显著性检验，说明选取的影响因素能够解释关中平原城市群韧性空间网络结构变化的24.2%，回归结果如表4所示。

具体来看：（1）地理空间邻近差异在1%的水平上显著为正，表明城市间越邻近，时间成本越低，则

表3 2011—2020年关中平原城市群韧性空间关联网络的中心性分析

Tab. 3 Centrality analysis of resilience spatial association network in Guanzhong Plain urban agglomeration from 2011 to 2020

城市	点度中心度				接近中心度				中介中心度			
	2011年	2014年	2017年	2020年	2011年	2014年	2017年	2020年	2011年	2014年	2017年	2020年
西安市	10	10	10	10	100.00	100.00	100.00	100.00	19.81	19.81	17.78	17.78
宝鸡市	6	6	6	6	71.43	71.43	71.43	71.43	1.11	1.11	1.11	1.11
铜川市	9	9	9	9	90.91	90.91	90.91	90.91	13.15	13.15	11.11	11.11
渭南市	5	5	6	6	66.67	66.67	71.43	71.43	0.56	0.56	1.11	1.11
商洛市	4	4	5	5	62.50	62.50	66.67	66.67	0.00	0.00	0.00	0.00
咸阳市	9	9	9	9	90.91	90.91	90.91	90.91	11.67	11.67	11.11	11.11
天水市	4	4	4	4	62.50	62.50	62.50	62.50	0.00	0.00	0.00	0.00
平凉市	6	6	6	6	71.43	71.43	71.43	71.43	1.11	1.11	1.11	1.11
庆阳市	5	5	5	5	66.67	66.67	66.67	66.67	0.00	0.00	0.00	0.00
运城市	5	5	6	6	66.67	66.67	71.43	71.43	1.48	1.48	1.11	1.11
临汾市	3	3	4	4	58.82	58.82	62.50	62.50	0.00	0.00	0.00	0.00

表4 关中平原城市群韧性空间关联影响因素的回归分析

Tab. 4 Regression analysis of the factors influencing spatial correlation of resilience in Guanzhong Plain urban agglomeration

变量名称	非标准化回归系数	标准化回归系数	显著性概率	概率1	概率2
地理空间邻近差异矩阵	0.424	0.406***	0.000	0.000	1.000
经济发展水平差异矩阵	−0.498	−0.320**	0.017	0.984	0.017
人口增速差异矩阵	−0.182	−0.093	0.102	0.898	0.102
对外开放度差异矩阵	0.308	0.214**	0.026	0.026	0.974
政府财政支持差异矩阵	0.482	0.249**	0.049	0.049	0.951
环境规制差异矩阵	−0.111	−0.055	0.207	0.793	0.207
交通基础设施差异矩阵	−0.239	−0.128*	0.066	0.934	0.066
科学技术水平差异矩阵	−0.319	−0.105*	0.053	0.947	0.053

注:*、**、***分别表示在0.1、0.05、0.01水平上显著。

更容易产生资源集聚与溢出。(2) 经济发展水平差异和对外开放度差异的回归系数分别为负、正,均在5%的水平上显著。分别说明经济发展水平差异对城市群韧性网络的负向作用明显,城市间经济均衡发展能够带动关中平原城市群各城市间韧性的协同发展;对外开放是实现互联互通的重要方式,依托对外开放水平高的城市带动对外开放水平低的城市,通过综合交通网络建设城市群东西双向贸易通道,对提升城市群韧性发展水平与城市群韧性网络的形成具有显著的正面影响。(3) 政府财政支持的回归系数为正且通过了5%以下的显著性检验,表明政府财政支持差异越大,城市间联系越多,政府有效的财政支持与正确的引导对城市群韧性网络的发展有显著影响。(4) 交通基础设施差异在10%的水平上显著为负,表明交通基础设施差异大对城市群韧性网络结构发展具有抑制作用,减少城市间的货物流动不利于拉动消费、生产,完善交通基础设施会促生城市群内的社会经济活动。(5) 科学技术水平差异的回归系数在10%的水平上显著为负,说明在一定程度上韧性资源更容易在科学技术水平相近的城市间流动,科学技术水平高的地方往往拥有更多科教创新人才以及较高的信息获取能力,因而如何减小地区间的科技水平差异仍是亟需解决的问题。(6) 人口增速差异与环境规制差异的回归系数为负但不显著,表明二者的降低对城市群韧性网络形成与发展的作用尚不明显。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 从时间上看,关中平原城市群内各城市韧性水平增长幅度明显。从空间上看,关中平原城市群韧性水平存在空间非均衡性,2020年韧性水平自省会开始向外围降低,中等韧性水平城市在城市群内呈大范围片状分布。

(2) 从整体网络特征看,网络关系数与网络密度的变化均呈上升、下降、再次上升的态势;网络等级度较高,城市间的韧性联系呈现较强的层级性特征;网络效率呈下降、上升、下降趋势,城市群网络结构的稳定性逐渐增强;"西咸一体"、铜川市为城市群的重要节点,但各城市尚未完全实现互相联通的状态。

(3) 从个体网络特征看,关中平原城市群韧性网络存在较明显的核心-边缘结构,西安市、咸阳市、铜川市的中心性保持在较高水平上,在网络结构中处于主导地位,能够对周边或边缘城市产生较多资源溢出;商洛市、天水市、庆阳市、临汾市处在城市群的边缘位置,在韧性资源扩散方面的作用较弱。

(4) 从QAP回归结果看,地理空间邻近、经济发展水平、对外开放度、政府财政支持、科学技术水平、交通基础设施差异矩阵均对关中平原城市群韧性空间网络结构变化的影响显著。

4.2 建议

本研究较为全面的揭示了关中平原城市群韧性空间关联网络的结构特征和各城市的功能特征,为地理空间角度下城市韧性发展研究提供新视角。此外,以往研究对综合性影响因素的分析较少,本文对城市群韧性关联结构的影响因素进行了探讨,旨在探寻提升关中平原城市群安全性与灵敏性的源动力,丰富了关中平原城市群韧性的研究内容。但仍存在一些不足,一是基于网络研究较少关

注灾害本身对城市的动态影响,由于指标获取的困难性未对评估灾害的相关指标详实量化;二是未将关中平原城市群韧性关联网络结构发展与其他城市群横向对比,未来研究可进一步完善。本文提出以下建议:

(1) 西安市、咸阳市、宝鸡市是城市群内资源与技术高集聚的地区,通过建设城际数字化管理与交流平台推动资源要素由高集聚地区向低集聚地区扩散;发挥西安市、咸阳市、铜川市的辐射作用,通过构建产业链、建立协调机制等方式促进资源流动,在规划中给予中小城市更多发展机会和空间,降低西安市的虹吸效应,减弱城市群内部的非均衡性、层级性。

(2) 将韧性建设理念融入到各地区的相关规划中,根据各地区韧性发展历史的不同因地制宜建立通讯、物流等子系统的适应性策略。在医疗、教育、就业等方面完善社会保障制度,在经济上发展特色产业,在城市管理上合理制定分布式的功能区等,缩小地区之间的差异。

(3) 城市群内可通过物联网、大数据进一步推进建设安全有效的综合交通运输网络,提高运输效率;增加财政支出对科学技术的支出,加大科技创新投入,科技水平较弱的城市要积极引入创新型人才;促进城市群内的商贸往来以及在"一带一路"建设中加强对外经济贸易,政府对产业基础薄弱、市场活力不足的城市制定导向型政策,推进关中平原城市群整体韧性水平发展。

参考文献(References)

[1] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 488-502. [Wei Ye, Xiu Chunliang. Study on the concept and analytical framework of city network resilience[J]. Progress in Geography, 2020, 39(3): 488-502.]

[2] 李彦军, 马港, 宋舒雅. 长江中游城市群城市韧性的空间分异及演进[J]. 区域经济评论, 2022, 56(2): 88-96. [Li Yanjun, Ma Gang, Song Shuya. Spatio-temporal differentiation of urban resilience in the Mid-Yangtze River urban agglomerations[J]. Regional Economic Review, 2022, 56(2): 88-96.]

[3] 贺山峰, 梁爽, 吴绍洪, 等. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1988-1999. [He Shanfeng, Liang Shuang, Wu Shaohong, et al. Analysis on spatio-temporal evolution and relevance of urban flood disaster resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1988-1999.]

[4] Lu H, Zhang C, Jiao L D, et al. Analysis on the spatial-temporal evolution of urban agglomeration resilience: A case study in Chengdu-Chongqing urban agglomeration, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 79: 103167, doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103167.

[5] 陈晓红, 娄金男, 王颖. 哈长城市群城市韧性的时空格局演变及动态模拟研究[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2000-2009. [Chen Xiaohong, Lou Jinnan, Wang Ying. Evolution and dynamic simulation of the temporal-spatial pattern of urban resilience in Harbin-Changchun urban group[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2000-2009.]

[6] 张鹏, 于伟, 张延伟. 山东省城市韧性的时空分异及其影响因素[J]. 城市问题, 2018(9): 27-34. [Zhang Peng, Yu Wei, Zhang Yanwei. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of Shandong Province's urban resilience[J]. Urban Problems, 2018(9): 27-34.]

[7] 宁静, 朱冉, 张馨元, 等. 内蒙古区县城市韧性评价与分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1217-1226. [Ning Jing, Zhu Ran, Zhang Xinyuan, et al. Evaluation and analysis of urban resilience of districts and counties in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1217-1226.]

[8] Li L, Zhang P, Wang C. What affects the economic resilience of China's Yellow River Basin amid economic crisis: From the perspective of spatial heterogeneity[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 9024, doi: 10.3390/ijerph19159024.

[9] Khan M, Wu Q, Yan S Q, et al. Factors affecting urban resilience and sustainability: Case of slum dwellers in Islamabad, Pakistan[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2021, 147(4): 04021053, doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000749.

[10] Shi J, Wang X, Wang C, et al. Evaluation and influencing factors of network resilience in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: A structural perspective[J]. Sustainability, 2022, 14: 8005, doi: 10.3390/su14138005.

[11] 蒋辉. 中国农业经济韧性的空间网络效应分析[J]. 贵州社会科学, 2022(8): 151-159. [Jiang Hui. Analysis of the spatial network effect of China's agricultural economic resilience[J]. Guizhou Social Sciences, 2022(8): 151-159.]

[12] 谢会强, 杨丹, 张宽. 中国城市经济韧性的时空演化及网络结构研究[J]. 华东经济管理, 2022, 36(11): 64-74. [Xie Huiqiang, Yang Dan, Zhang Kuan. Spatio-temporal evolution and network structure of urban economic resilience in China[J]. East China Economic Management, 2022, 36(11): 64-74.]

[13] 张明斗, 张震. 长三角城市群城市经济韧性的空间关联网络研究[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(1): 69-79. [Zhang Mingdou, Zhang Zhen. Spatial correlation network of urban economic resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Geography and Geo-information Science, 2023, 39(1): 69-79.]

[14] 王璇, 史佳璐, 慈福义. 黄河流域城市群韧性度的时空演化特征[J]. 统计与决策, 2022, 38(5): 70-74. [Wang Xuan, Shi Jialu, Ci

Fuyi. The spatio-temporal evolution characteristics of resilience of urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Statistics and Decision, 2022, 38(5): 70−74.]

[15] 王世亮. 内蒙古城市韧性评价及其提升策略研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022. [Wang Shiliang. Research on urban resilience and improvement methods of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2022.]

[16] 郝辑, 张少杰. 基于熵值法的我国省际生态数据评价研究[J]. 情报科学, 2021, 39(1): 157−162. [Hao Ji, Zhang Shaojie. Evaluation of inter-provincial ecological data in China based on entropy method[J]. Information Science, 2021, 39(1): 157−162.]

[17] 孙中瑞, 樊杰, 孙勇, 等. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素[J]. 经济地理, 2022, 42(3): 33−43. [Sun Zhongrui, Fan Jie, Sun Yong, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in China[J]. Economic Geography, 2022, 42(3): 33−43.]

[18] 李南, 李晓东, 刘想, 等. 新疆区域经济联系网络时空格局演变[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1978−1987. [Li Nan, Li Xiaodong, Liu Xiang, et al. Evolution of spatial and temporal pattern of regional economic connection network in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1978−1987.]

[19] 贾建琦, 赵林, 高晓彤, 等. 环渤海地区包容性绿色增长效率的空间关联网络结构及其影响因素[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(5): 46−54. [Jia Jianqi, Zhao Lin, Gao Xiaotong, et al. Spatial correlation network structure of inclusive green growth efficiency and its influencing factors in Bohai Rim region[J]. Geography and Geo-information Science, 2021, 37(5): 46−54.]

[20] 岳立, 雷燕燕. 黄河流域绿色水资源效率空间关联网络构建及其演化因素[J]. 西北师大学报(社会科学版), 2022, 59(2): 62−74. [Yue Li, Lei Yanyan. Construction of spatially linked network of green water resources efficiency in the Yellow River Basin and its evolutionary factors[J]. Journal of Northwest Normal University (Social Sciences Edition), 2022, 59(2): 62−74.]

[21] 石涛. 黄河流域城市韧性发展水平的时空演进及驱动要素分析[J]. 区域经济评论, 2022(1): 139−149. [Shi Tao. The analysis of the spatiotemporal evolution and driving factors of urban resilience in Yellow River Basin[J]. Regional Economic Review, 2022(1): 139−149.]

[22] 高志刚, 丁煜莹. 中国西北地区城市的韧性测度及影响因素[J]. 科技导报, 2021, 39(24): 118−129. [Gao Zhigang, Ding Yuying. Measurement of urban resilience and its influencing factors of cities in northwest China[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(24): 118−129.]

[23] 张筱娟, 汤琪凤, 张镇. 黄河流域城市韧性空间分异特征及其影响因素识别[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(6): 48−54. [Zhang Xiaojuan, Tang Qifeng, Zhang Zhen. Spatial differentiation characteristics and its influencing factors of urban resilience in the Yellow River Basin[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(6): 48−54.]

Resilience spatial correlation network and its influencing factors in Guanzhong Plain urban agglomeration

SHI Yufang, NIU Yu
(College of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This study constructed an urban resilience evaluation index system that included four dimensions: economy, society, ecological environment, and infrastructure. Based on the entropy method, the resilience comprehensive evaluation index of 11 cities in the Guanzhong Plain urban agglomeration, northwest China from 2011 to 2020 was measured, and the spatiotemporal evolution characteristics of their resilience were analyzed, and moreover, the social network analysis method was used to analyze the structural and functional connections between cities in the resilience network of the Guanzhong Plain urban agglomeration. Furthermore, the quadratic assignment procedure was used to explore the comprehensive factors that affected the resilience network structure of the Guanzhong Plain urban agglomeration. The results indicated the following. (1) The overall resilience of each city in the Guanzhong Plain urban agglomeration was on the rise, and the resilience level showed a decreasing trend from provincial capital to the periphery. (2) The resilience network structure of urban agglomerations had become more complex and robust; however, the resilience connections between regions exhibited strong hierarchical characteristics and cities had not yet fully achieved interconnectivity. (3) Xi'an, Xianyang, and Tongchuan had strong centrality and could generate significant resource spillovers to surrounding or peripheral cities. The "core-edge" structure of urban agglomerations was obvious. (4) The level of economic development, openness, government financial support, scientific and technological development, differences in transport infrastructure, and geographical proximity all significantly affected changes in the resilient spatial network structure of the urban agglomeration. Therefore, to enhance the resilience of the Guanzhong Plain urban agglomeration and the connection between cities, one must first build an intercity digital management and exchange platform and promote the diffusion of resource elements from high- to low-agglomeration areas. Second, the construction of transportation networks must be strengthened, investment in scientific and technological innovation must be increased, and foreign trade and economic cooperation must be strengthened in the construction of "the Belt and Road". This study reveals the position and role of each city in the resilience development process in the spatial association network of the Guanzhong Plain urban agglomeration, analyzes the spatial spillover effect of resilience development in the Guanzhong Plain urban agglomeration, and provides a new perspective on the study of urban resilience development from a geographically spatial perspective.

Key words: urban resilience; spatial correlation network; social network analysis; Guanzhong Plain urban agglomeration